

**Balázs László**

## **Behálózva**

Barabási Albert-László: Behálózva. A hálózatok új tudománya  
Magyar Könyvklub, Budapest. 2003.

A Magyar Könyvklub gondozásában megjelent kötet egy globális célt tűz ki maga elé: azt vizsgálja, hogy mennyire vagyunk kitéve az internetes támadásoknak. A kérdés megválaszolásához az olvasót rávezeti a hálózatokban való gondolkodásra, azáltal, hogy bemutatja a hálózatok tudományának átfogó történetét mind az elmélet, mind a gyakorlat oldaláról. A szerző – Erdélyből elszármazott világhírű tudós, az MTA külső tagja – 1995 óta az Indiana állambeli Notre Dame-i Egyetem fizikaprofesszora. Tanulmányait Bukarestben, Budapesten, majd a Bostoni Egyetemen végezte. Munkájában összefoglalja a hálózatokról eddig alkotott elméleteket, azok bizonyítását és cáfolását. Barabási Albert-László a hálózatok vizsgálatára több kutatócsoportot is felállított, melyeknek szinte mindig tagja volt *Albert Réka* és *Hwoong Jeong*. Kutatócsoportjaiban és személyes munkásságában a hangsúly elsősorban az internetre mint hálózatra helyeződött, ennek megértéséhez számos más hálózat – általuk vagy mások által elvégzett – elemzését is felhasználta.

Történeti áttekintésben egészen a 18. században élt *Leonhard Euler* szentpétervári matematikusig megy vissza, aki kutatásaival megalapozta a matematika egy összetett ágát, a *gráfelméletet*. Munkásságát követően a gráfelmélet fejlődéséhez a világ legnagyobb matematikusai járultak hozzá. Már ekkor kialakult az a nézet, mely szerint az összetett világ megértésének a kulcsa a gráfok vagy hálózatok felépítésének, szerkezetének megismerése. A 20. század első felében az elmélet célja a hálózat tulajdonságainak feltárása és kategorizálása volt. A század közepét követően azonban egy újabb probléma kerül a kutatás középpontjába: milyen módon jönnek létre a hálózatok?

A kérdésre először két magyar tudós – *Erdős Pál* és *Rényi Alfréd* – kísérelt meg választ adni. Ők a gráfokat és az általuk ábrázolt világot alapvetően véletlennek látták, ezért nevezték elgondolásukat *véletlen gráfok elméletének*. A kapcsolatok teljesen véletlenszerűen jönnek létre, eloszlásukat vizsgálva kimondhatjuk, hogy ha a hálózatban található pontok átlag egy kapcsolathoz kevesebbnel rendelkeznek, akkor a hálózat kiscsoportokra esik szét. Ezzel szemben a természet messze túllépi az átlag egy kapcsolatot, és sűrű hálózatot alkot, melyben minden pont elérhető. Az elmélet szerepét a szerző nagyon jól szemlélteti azáltal, hogy bemutatja a társadalomra való

alkalmazását, melyet *Bollobás Béla* igazolt. Bizonyítását ma *Poisson-eloszlásként* tartják számon. Ezen elmélet szerint a hálózatban az átlagok dominálnak, csak ritkán találkozhatunk olyan elemmel, mely sok (szociális ember) vagy kevés (aszociális ember) kapcsolattal rendelkezik. Tehát minden véletlenszerű? Nem valószínű. Mégis, az Erdős–Rényi páros kutatásai több évtizeden keresztül uralták a hálózatkutatást. Feltehetjük a kérdést: akkor milyenek a valódi hálózatok?

Karinthy szerint két ember között a távolság 5 lépés. Láncszemek című novellája írásakor (1929) még nem sejthette, mennyire közel áll az igazsághoz. Az ismeretségi hálózatok kutatásával foglalkozó *Stanley Miligram* bebizonyította, hogy két – egymástól teljesen idegen – ember között az átlagos távolság körülbelül hat ember. A hat kapcsolat a felső határt jelöli, mivel nem ismerjük az egyes embereknek a kapcsolathálóját. Kis világban élünk! Világunk azért kicsi, mert a társadalmi kapcsolatok nagyon sűrű hálót alkotnak. A társadalomhoz hasonlóan az internet is egyetlen hatalmas hálózatot alkot, több millió dokumentumot fon össze, ezáltal megalkotva a modern információs társadalom szövetét. Az óriási mennyiségű dokumentum ellenére ma már tudjuk – Albert Réka és Hwoong Jeong kutatásainak köszönhetően –, két tetszőleges weblap közötti távolság nem több, mint tizenkilenc kattintás. Sőt, biztos állíthatjuk, hogy ez a szám – a hattal együtt – folyamatosan csökken, zsugorodik a világ!

*Mark Granovetter* szerint a társadalom több kis szorosan összetartozó csoportra tagolódik, melyeket egymással *gyenge kapcsolatok* kötnek össze. A gyenge kapcsolatok résztvevői két, egymás számára teljesen idegen baráti körnek a tagjai. A két társaság eltérő forrásokból szerzi be információit, így például ha valaki munkát keres, nagy valószínűséggel sikerebben tud érvényesülni, ha a gyenge kapcsolataira hagyatkozik. (Tudniillik, egy baráti körön belül nagy többséggel azonos érdeklődésű emberek tartózkodnak.) Granovetter elméletén tovább haladva *Duncan Watts* és *Steven Strogatz* egy új fogalmat vezettek be a hálózatkutatásba, a *csoportterősségi együtthatót*, mely megmutatja, milyen szorosan kapcsolódik össze a csoport.

A tudomány hálója világméretű ismertségi hálózatot alkot, hasonlóan a társadalomhoz, azzal a különbséggel, hogy a benne létrejövő kapcsolatokat folyamatosan publikálják. Ha a kapcsolatok véletlenszerűen köttetnének, akkor az együtthatójuk nagyon kicsi lenne, de nem így van. Számítások azt igazolják, hogy csoportokban gazdag hálózatot alkotnak. *Newman* bebizonyította, hogy a tudomány mindennapjai sűrűn összekapcsolt csoportokban zajlanak, mely közösségekben – akár a társadalomban, akár a weben – jelen van a csoportképződés. Watts és Strogatz a csoportképződés leírására a véletlen hálózattól eltérő modellt javasolja. Elméletükben összeegyeztetik a véletlen hálózatok modelljét és a csoportképződést. E szerint ismerjük a „szomszédainkat”, valamint a rokonainkat, akik véletlenszerűen a világ bármely részén elhelyezkedhetnek. Így számolhatunk mind a csoportképződés jelenségével, mind a véletlenszerűséggel. Valami azonban még mindig hiányzik. Ha csak a saját

ismertségi hálózatunkat vizsgáljuk meg, rádöbbenünk, hogy vannak benne olyan személyek, akik kiugróan sok kapcsolattal rendelkeznek.

*Malcolm Gladwell* megvizsgálta, hogy mennyire vagyunk szociálisak. Megállapította, hogy az élet minden területén van egy maréknyi olyan ember, aki könnyedén létesít kapcsolatokat. Ők az *összekötők*. Rendhagyóan sok kapcsolattal rendelkeznek, így az előző két modellünk alkalmazhatósága kérdésessé vált. Az internet esetében is ki tudjuk mutatni, hogy vannak olyan oldalak, melyekre kiugróan sok link mutat, ezek a *középpontok* uralják a netet. Ugyanezt a jelenséget akár a hollywoodi színészek esetében is ki tudjuk mutatni. Itt több kis világ létezik (például akció-, erotikus, mesefilmek). Azok az összekötők, akik több helyen is feltűnnek, több műfajban is szerepelnek.

A középpontok, összekötők uralják az összes hálózat szerkezetét. Amelyben jelen vannak, elérik, hogy azok kis világoknak látszódjanak. A középpontokat sem az Erdős–Rényi, sem a Watts–Strogatz-modell nem magyarázza, sőt nem tekintik őket létezőknek.

Hawoong Jeong által készített program segítségével kimutatható, hogy az internet a kapcsolatok szempontjából az úgynevezett *hatványfüggvény* nevű matematikai kifejezéssel egyeztethető, mely a csúcsok összeköttetései az eloszlására érvényes. A függvény sajátossága, hogy a sok kis esemény mellett néhány nagyon nagy esemény is található. A csúcsok kapcsolatainak a számát nevezik *fokszámnak*. A hatványfüggvény-eloszlással leírható hálózatokat *skálafüggetlen hálózatoknak* nevezzük. (A véletlen hálózatokban a pontok fokszámának van egy jellemző nagysága, egy skálája, amelyet a fokszámeloszlási grafikon csúcsa határoz meg. A skálafüggetlen hálózatoknak nincs skálájuk, nincs olyan pont, amely eléggé hasonlítana a többihez.) Ez a hálózat elismeri a középpontok létezését, melyek befolyásolják a szerkezeti stabilitást, a dinamikus viselkedést, a valódi hálózatok hibákkal és támadásokkal szembeni tűrőképességét.

Az Erdős–Rényi-modell két alapállítása – miszerint a pontok száma ismert, nem változó, valamint a pontok egyenrangúak – megdőlt. A valódi hálózatok közös vonása a *növekedés*. Az eddig említett két modell ezzel szemben statikus, és nem számolnak a *népszerűséggel* mint tényezővel. A pontok nem véletlenszerűen kapcsolódnak a hálózatba, hanem a több kapcsolattal rendelkező pontokhoz csatlakoznak. („A gazdag egyre gazdagabb lesz!”) A skálafüggetlen modell alapesetként szolgál, azonban ebből is hiányzik a belső kapcsolatok kialakulására, valamint a kapcsolatok eltűnésére vonatkozó magyarázat. Emellett az a feltevés, miszerint az újaknak nincs esélyük, sem állja meg a helyét. Számos példát tudunk mondani akár gazdasági, akár más területen arra, hogy az „új fiú” magához ragadta a események irányítását. Gondoljunk csak a Google-ra.

A pontok egyéni tulajdonságával a skálafüggetlen modell nem számol, holott minden pont különböző. Ezen tulajdonság figyelembevételére egy újabb fogalmat,

az *alkalmasságot* vezették be a hálózatok topológiájába. Az *alkalmasság* mértéke befolyásolja, hogy mit tekintünk vonzónak. Nagyobb *alkalmasság* több kapcsolatot jelent. Az *alkalmassági modell* a korábbi leírásokat kiegészítve, magában foglalja a hálózat növekedési, népszerűségi, *alkalmassági* tulajdonságait. *Ginestra Bianconi* számításaiban összekapcsolta az *alkalmassági* modellt a *Bose–Einstein-kondenzáci*óval. Ennek értelmében a legalkalmasabb pont elvileg magához ragadhatja az összes linket. („A győztes mindent visz.”)

A pontok és a kapcsolatok természetétől függetlenül a hálózat viselkedését és topológiáját *alkalmassági* eloszlásának alakja határozza meg. Lehet haranggörbe vagy hatványfüggvény. Ahol a skálafüggetlen eloszlás alakul ki, ott a „gazdagabb egyre gazdagabb lesz” típusú hálózatról beszélhetünk, ahol a haranggörbe érvényesül, ott egy csillag alakul ki, mely szétrombolja a hierarchiát. Itt nincs vetélytárs, hanem középpont és sok kis pont van. Ilyen például a Windows operációs rendszer elterjedése – „a győztes mindent visz”.

Ne feledkezzünk meg az egyik legfontosabb – gyakorlati – kérdésről, melynek megválaszolása nagyban hozzájárulhat sejt kutatástól az internetig minden tudományág fejlődéséhez: mennyire ellenállóak a hálózatok a hibákkal és a támadásokkal szemben?

A hálózat pontjainak eltávolítása könnyen részekre bonthatja a hálózatot. Létezik egy *kritikus küszöb*, mely alatt a hálózat alig szenved kárt. Ha viszont átlépjük ezt a küszöböt, a hálózat részekre hullik. Skálafüggetlen hálózatok esetében a pontok 80%-át tudjuk véletlenszerűen eltávolítani anélkül, hogy a rendszer széthullana. A meghibásodás a kis- és középpontokra ugyanúgy hat. Mivel a kis pontok nagyobb számban vannak jelen, nagyobb valószínűséggel romlanak el. *Shlomo Havlin* és kutatócsoportja állapította meg, hogy a skálafüggetlen hálózatokban a küszöbérték eltűnik, ha a fokszámmérő kisebb háromnál vagy egyenlő azzal. Ezek a hálózatok soha nem esnek szét. Kritikus pont akkor létezik, ha tudatosan a középpontokat távolítjuk el. Elmondhatjuk, hogy ezek a hálózatok a meghibásodásokkal szemben ellenállóak, azonban ennek az ellenálláságnak az az ára, hogy a támadásokkal szemben gyengék. A középpontok 5–15%-át kell egyidejűleg eltávolítanunk ahhoz, hogy sebet ejtsünk a hálózaton.

Számolnunk kell egy a mindennapokból ismert hatással is. Egy-egy meghibásodás lavinaszerű láncreakciót indíthat el. A lavina hatása és nagysága az első kieső pont helyzetétől függ. Watts kimutatta, hogy a lavina nem azonnal jön létre, sok észrevétlen hiba akad mielőtt beköszöntene az összeomlás.

Mi a helyzet a vírusokkal? A vírusok vagy újítások elterjedésére és eltűnésére is kidolgoztak egy elméletet, ez a *küszöbértékmodell*. E szerint mindannyian különböző mértékig vagyunk fogékonyak az újításokra. Elegendő pozitív bizonyossággal azonban bárki meggyőzhető. A különbségeket tudomásul véve minden egyénhez egy küszöbértéket rendel, mellyel mennyiségileg kifejezi, hogy elfogadja-e az adott

egyen az újítást. Minden újításnak jól definiálható terjedési értéke van. Ha a hálózat tulajdonságainak együtteséből kiszámított küszöbérték nagyobb, mint a terjedési érték, akkor az a termék hamarosan el fog tűnni.

A küszöbértékmodell nagy általánosságban elterjedt, de néhány vírusra és újításra nem alkalmazható. A *Trieszt-tanulmány* szerint a skálafüggetlen hálózatok esetén a küszöbérték eltűnt. A vírus akkor is elterjedt, ha nem volt nagyon fertőző. Az ilyen típusú hálózatoknál nem vesznek figyelembe semmilyen küszöbértéket. Kimutatták, hogy a fizikai kapcsolatokkal összekötött routerek összessége skálafüggetlen hálózatot alkot. Ezen tény bizonyításával meg is magyarázták, hogy miként lehetséges az, hogy egyes számítógépes vírusok évek után is fennmaradnak, a vírusölők elterjedése ellenében is.

Az internet modellezéséhez figyelembe kell venni a sajátosságait: növekedésének összjátékát, népszerűségi kapcsolatok létrejöttét, távolságtól való függőséget – internetre való csatlakozás tekintetében –, valamint a mögöttes fraktálszerkezetet. A tulajdonságok kiegyensúlyozzák egymást, fenntartva a skálafüggetlen internetet.

Az internet részletesebb megismerése céljából további kutatásokat végeztek. Barabási és kutatócsoportja bebizonyította, hogy képesek vagyunk több mérföldre lévő számítógépet arra kényszeríteni, hogy a mi érdekünkben végezzen el számításokat. *Steve Lawrence* és *Lee Giles* egy metakereső segítségével meg tudta becsülni a világháló méretét, mely 1997-ben mintegy 300 millió dokumentumot számlált. A metakereső képes arra, hogy a különböző keresőktől megérdeklődjön: egy adott kifejezés hol található. Mivel egy kereső sem fedi le az internetet, és egyenként más-más területet vizsgálnak kisebb átfedéssel, így lehetőségessé vált a méret megbecslése.

A web egy irányított hálózat. A linkek mindig mutatnak valamerre: A pontból egy lépéssel eljuthatunk B-be, de visszafelé már nagy valószínűséggel hosszabb utat kell bejárnunk. Tovább haladva az irányított hálózat gondolatán, az internet négy szigetre tagolható: központi mag, be kontinens, ki kontinens, indák és szigetek. A be kontinensről a központi mag felé, onnan pedig a ki kontinens felé vezetnek a linkek. A keresők számára a be kontinens, az indák és a szigetek el vannak szigetelve, a rajtuk lévő tartalmat nem találják. Ha a weblapunk egy ilyen szigetre került – a keresők által biztosított szolgáltatásnak köszönhetően –, elküldhetjük az URL címünket a keresőknek, így azok látni fogják az oldalunkat.

A könyv főbb gondolatait végighaladva, részletesen megismertedtünk a hálózatok tudományának fejlődésével, annak több szempontból elvégzett elemzésével. Sokakban felmerülhet a kérdés: milyen haszna van a mindennapjainkban ennek a tudománynak? A kérdés bennem is felmerült, és megdöbbsen, amikor a könyv felfedte a hálózatok kiemelten fontos szerepét életünkben, a sejtek alkotta hálózat elemzésétől a hollywoodi sztárokon át egészen az internetig.

Barabási Albert-László könyve részletes elméleti levezetések mellett szemléletesen mutatja be az egyes hálózatok működésére jellemző általános szabályokat.

A hálózatok bemutatását gazdag példatárral, érdekesebbnél érdekesebb esetekkel illusztrálja, részletes elemzést kapunk az egyes elméletekről, azok fejlesztéséről. Munkájában hangsúlyosan szerepel kutatócsoportja által elért eredmények bemutatása is. A hálózatok ismertségének fontosságát hangsúlyozva, a könyv két fejezete szemlélteti a hálózatok kialakulásával, tulajdonságaival kapcsolatos tudás gyakorlati szerepét. Ezek a fejezetek a sejtrendszer, valamint a gazdaságot elemzik. Fölismeri, hogy a hálózatok tulajdonságainak ismeretében sok olyan – az emberiség egészét érintő – problémát tudnánk megoldani, melyeket ma még elképzelhetetlennek tartunk.